

Etude d'un capteur à fibre optique en fonction de ses caractéristiques opto-géométriques

M. BARBACHI¹, F. BOURQUIN²

¹Equipe Matériaux, Mécanique et Génie Civil (E2MGC), ENSA, Université Ibn Zohr, BP 1136 Agadir - Maroc
Email : m.barbachi@uiz.ac.ma

²IFSTTAR, 14-20 Boulevard Newton - Cité Descartes - Champs-sur-Marne 77447 - Marne-la-Vallée Cedex 2 - France

Résumé

Cette étude concerne le développement d'une instrumentation dédiée à l'analyse du trafic routier et plus précisément le pesage en marche de véhicules.

Dans ce travail, nous présentons à la fois l'étude numérique et expérimentale du dispositif composé d'une fibre optique monomode insérée entre deux lames métalliques, les bords étant solidaires par sertissage. Du point de vue pratique, ce travail a débouché sur la mise à disposition d'un moyen de dimensionnement du capteur prenant en compte les caractéristiques d'environnement et les conditions d'utilisation.

Mots clés : Capteurs à fibres optiques, couplage élasto-optique, modélisations mécaniques, éléments finis, expérimentations.

1. Introduction

Suite aux retombées de la recherche en matière de télécommunications, de nombreux laboratoires ont étudié sérieusement la possibilité de mesurer certaines grandeurs physiques à l'aide de fibres optiques. Toutefois, malgré l'existence d'une bibliographie assez riche concernant les principes des capteurs et leur réponse intrinsèque, très peu de travaux ont abordé leur réponse extrinsèque, c'est-à-dire, qui prennent en compte l'ensemble capteur-milieu d'emploi. C'est précisément sur ce point que nous avons basé ce travail qui consiste, compte tenu de l'enjeu de la gestion du trafic routier, à développer un système de mesures fiable permettant le pesage en marche de véhicules à l'aide de fibres optiques, capable de résister à des conditions d'usage [1].

2. Capteur noyé dans un massif élastique

Le capteur est constitué d'une fibre optique monomode insérée entre deux lames métalliques rendues solidaire par le bord, dont l'épaisseur et la largeur sont variables (Fig.1), [2-5]. Il est, ensuite, placé sur le support inférieur d'un tube métallique de forme U. Ce tube est rempli par un matériau élastique de type polyuréthane subissant un chargement uniformément réparti simulant la charge roulante d'un véhicule (Fig.2). Sur le plan mécanique, le problème posé consiste à déterminer l'état de contraintes au cœur de la fibre pour différentes géométries du ruban lorsque le massif est sollicité.

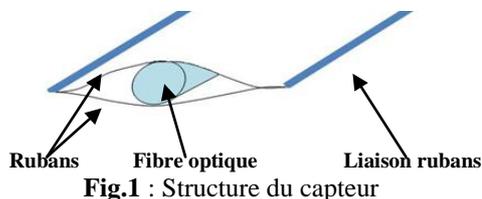


Fig.1 : Structure du capteur

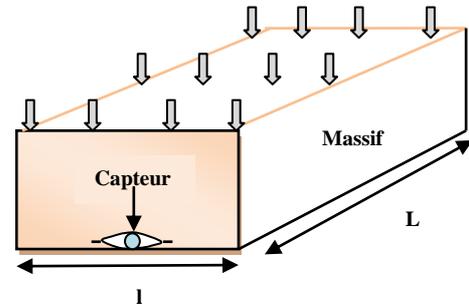


Fig. 2: Capteur inséré dans le massif

3. Modélisations mécaniques

Etant donné les dimensions du problème (l/L), nous nous sommes placés dans l'hypothèse des déformations planes (DP) et avons tenu compte de la symétrie du problème.

En seconde approche, nous avons modélisé le ruban par une poutre rectiligne reposant sur deux appuis respectivement élastique et rigide. Dans ces conditions, le premier type d'appui, caractérisé par une rigidité variable K , simule le comportement de la fibre optique ; et le second, il modélise la liaison physique entre deux rubans.

Le calcul de la rigidité de la fibre K met en cause, parallèlement aux paramètres de déformations classiques, la surface de contact développée au voisinage de la liaison (ruban-fibre). Cette déformation est donnée par l'expression [6] :

$$\delta = \frac{4R(1-\gamma_1^2)}{\pi E_1} [\text{Ln}(4a/b) - 1/2] \quad (1)$$

Pour une longueur unitaire où b désigne la surface de contact développée au voisinage de l'interface de la fibre et du ruban. Elle forme ici un rectangle de demi largeur b égale, dans le cas général, à :

$$b = 2\sqrt{\frac{aR}{\pi} \left(\frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2} \right)} \quad (2)$$

Avec γ_1 , E_1 et γ_2 , E_2 les coefficients de poisson et les modules d'Young respectifs de la fibre et du ruban et a le rayon de la fibre.

L'expression (2) injectée dans l'équation (1), sachant que la rigidité K s'obtient par $K = \frac{dR}{d\delta}$, donne après

développement :

$$K = \frac{\pi E_1}{2(1-\gamma_1^2) \ln\left(\frac{0,2\pi a}{R\left(\frac{1-\gamma_1^2}{E_1} + \frac{1-\gamma_2^2}{E_2}\right)}\right)} \quad (3)$$

Pour les caractéristiques mécaniques suivantes d'une fibre monomode en silice : $E_1=70000\text{MPa}$, $\nu_1=0,16$, $a=0,00625\text{mm}$ et celles d'un ruban métallique $E_2=200000\text{MPa}$, $\nu_2=0,2$, on trouve :

$$K = \frac{112728}{7,65 - \ln(R)} \text{ N/mm} \quad (4)$$

En définitif, le problème final à résoudre revient donc à modéliser la structure suivant la Fig.3.

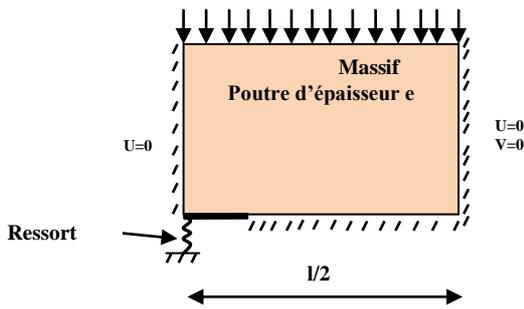


Fig.3 : Le modèle d'étude final

La résolution du problème consiste à extraire la réaction de la poutre au niveau de l'appui élastique modélisant la fibre optique lorsque le massif est soumis à un chargement uniforme et ceci pour différentes géométries du ruban. Compte tenu du fait que la rigidité K de l'appui élastique est variable en fonction de la réaction appliquée (éq.3), un calcul itératif s'impose. Il s'agit, pour une rigidité K donnée, d'ajuster la charge extérieure appliquée au massif afin que la réaction obtenue tende vers la solution R_0 (R_0 est liée à la rigidité K par l'intermédiaire de l'équation (3) ou (4)).

Les différentes étapes du calcul sont effectuées à l'aide de la méthode de discrétisation par éléments finis programmée dans le progiciel CESAR-LCPC [7]. La Fig.4 présente les résultats des calculs effectués.

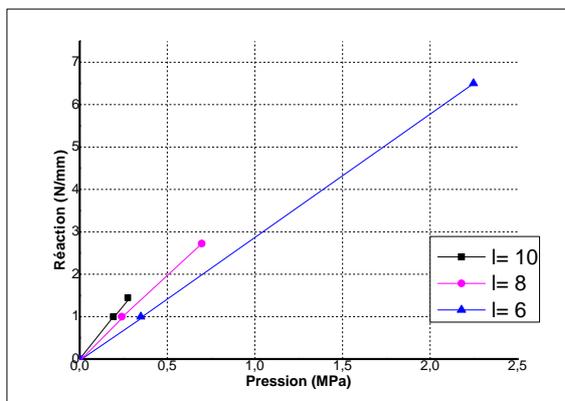


Fig.4 : Sensibilité du capteur en fonction de la pression appliquée au massif. $e=0.08\text{mm}$

Cette courbe traduit le comportement du capteur en fonction de sa géométrie au sein d'un massif élastique sous charge. On constate d'une part que la réaction de la fibre, synonyme de la sensibilité du capteur, augmente

proportionnellement avec la charge avant d'atteindre la charge critique et d'autre part, que cette sensibilité est directement liée aux caractéristiques dimensionnelles du ruban (rigidité).

4. Couplage élasto-Optique

Dans la région monomode, le déphasage se réduit à l'expression :

$$\Delta\phi = \frac{(1+\gamma)(P_{12} - P_{11})L\beta n^2}{2E} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (5)$$

Ce déphasage est lié au nombre de passages de maximum de lumière, m , en sortie de fibre par :

$$2\pi m = \frac{(1+\gamma)(P_{12} - P_{11})L\beta n^2}{2E} (\sigma_x - \sigma_y) \quad (6)$$

A travers les résultats de l'étude mécanique développée et plus particulièrement l'expression de la réponse du cœur de la fibre en termes de contraintes, réaction R et nombre de franges m , on démontre que :

$$R = \frac{\pi d E \lambda}{4(1+\gamma)(P_{12} - P_{11})n^3} m \quad (7)$$

où les P_{11} et P_{12} sont les composantes caractéristiques de l'état d'anisotropie de la silice.

Pour une fibre monomode, de diamètre du cœur $d = 10 \cdot 10^{-6} \text{ m}$, éclairée par une source lumineuse de longueur d'onde $\lambda = 1,3 \cdot 10^{-6} \text{ m}$ et de caractéristiques opto-mécaniques suivantes : $n = 1,456$, $P_{11} = 0.121$, $P_{12} = 0.27$, $E = 7 \cdot 10^{10} \text{ N/m}^2$ et $\gamma = 0,16$, la réaction de la fibre calculée à partir de l'équation (7) est égale à : $R = 16,74 \text{ m}$ (8)

De même le nombre de franges en fonction de la pression appliquée au massif peut être calculé en utilisant, d'une part la courbe de variations présentée sur la figure 4 et, d'autre part, l'expression de l'équation (8).

Soit $m = \frac{RL}{16,74}$, où L étant la longueur du capteur.

A titre d'application, utile pour la partie expérimentale, nous allons calculer le nombre de franges en fonction de la pression appliquée, dans le cadre d'un ruban d'épaisseur $e = 0,08 \text{ mm}$ de largeur $l = 10 \text{ mm}$ et d'une longueur d'interaction $L = 200 \text{ mm}$. Les résultats sont illustrés par la Fig.5.

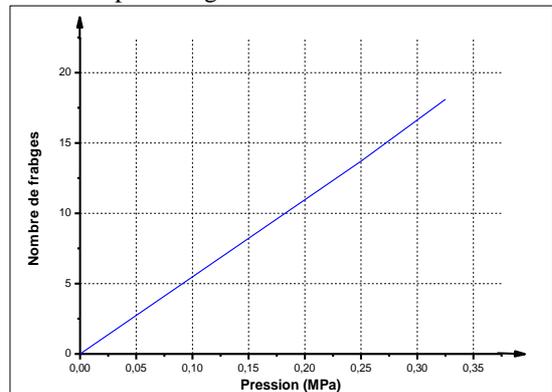


Fig.5 : Réponse du capteur de longueur $L=200\text{mm}$, sous sollicitation du massif, de largeur de ruban $l = 10\text{mm}$ et d'épaisseur $e = 0.08\text{mm}$

5. Validation par l'expérience

Les essais ont porté sur un capteur composé d'une fibre optique monomode 10/125/250 et d'un ruban métallique de caractéristiques dimensionnelles $e = 0,08mm$ et $l = 10mm$. Ces essais ont pour but principal la validation des modèles théoriques exposés précédemment. Ainsi, nous avons procédé à l'examen expérimental du comportement extrinsèque du capteur lorsqu'il est inséré dans un massif élastique de type polyuréthane. Le système de chargement est composé d'un cadre rigide et d'un dynamomètre sensible au déplacement. Son principe de fonctionnement repose sur la déformation verticale de l'anneau (Fig.6).



Fig.6 : Dispositif expérimental

Une source lumineuse (diode laser de longueur d'onde $\lambda = 1,3\mu m$) éclaire un polariseur qui permet d'obtenir une lumière polarisée rectilignement dont l'orientation du champ électrique est connue et maîtrisable et telle que l'intensité de ce champ demeure constante quelle que soit la direction considérée. La lumière étant injectée dans la fibre optique, les effets de la biréfringence accidentelle liés au chargement mécanique sont mesurés en sortie d'un analyseur ; l'intensité résultante est recueillie sur un récepteur. L'expérimentation consiste à relever la valeur de la tension de sortie enregistrée par le voltmètre en fonction de la charge appliquée sur une longueur d'interaction $L=200mm$. La Fig 7 présente les principaux résultats.

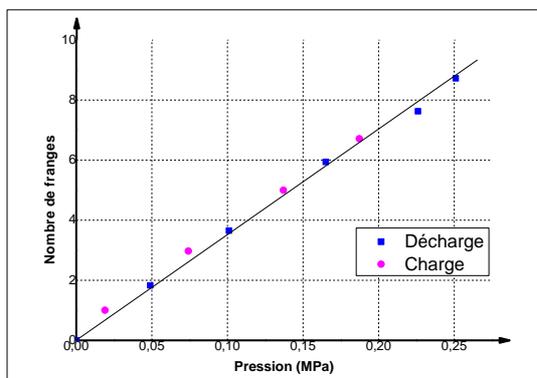


Fig.7 : Réponse du capteur, recouvert d'araldite sablée, noyé dans un massif en polyuréthane

Les résultats obtenus sont satisfaisants à plus d'un titre :
 - Ils permettent de vérifier la linéarité de comportement du nombre de franges en fonction de la charge appliquée.

- Ils mettent en évidence une reproductibilité des mesures convenables pendant les deux phases charge et décharge, ainsi que leur fiabilité.
- Ils corroborent les modèles théoriques étudiés précédemment (Fig.5) moyennant une différence de sensibilité liée au matériau d'enrobage du capteur par une araldite sablée afin de permettre une meilleure adhérence entre le matériau d'enrobage (polyuréthane), le capteur et le profilé. En effet, en comparant les modèles respectivement théorique (Fig.5) et expérimental (Fig.7), on constate que le premier présente une sensibilité 2 fois supérieure au second.
- Ils montrent la faisabilité pratique pour réaliser de tels dispositifs.

6. Conclusion et perspectives

Dans cet article, nous nous sommes attachés à modéliser la réponse du capteur dans son milieu d'emploi en étudiant un comportement global faisant intervenir à la fois l'élément sensible mais également les propriétés du matériau d'enrobage.

La validation de l'ensemble des modèles a été réalisée en laboratoire au moyen d'expériences sur maquette. Les résultats obtenus, satisfaisants dans l'ensemble, ont confirmé la faisabilité d'un tel dispositif et son utilisation sur site réel peut être envisagée.

Cependant pour développer un système complet prenant en compte l'élément sensible, son étalonnage sur site, la tête optoélectronique, l'acquisition, le traitement et l'exploitation des signaux, il faudrait nécessairement disposer d'un modèle d'exploitation lié à la propriété d'usage envisagée.

A titre d'exemple, si nous voulons accéder à une charge statique d'un véhicule par une mesure d'effort dynamique à l'aide de fibres optiques, la prise en compte dans le modèle d'exploitation des caractéristiques routières du site, de la dynamique du véhicule (suspension, pression des pneumatiques,...) s'impose.

Références

- [1] ICWIM7: 7^{ème} conférence internationale sur le pesage en marche, Foz do Iguaçu, Brésil, 2016
- [2] S. Villalba, R. Casas Joan, *Application of optical fiber distributed sensing to health monitoring of concrete structures*. Mechanical Systems and Signal Processing, 2012.
- [3] A. Tardy, M. Jurczyyszyn, J.M. Caussignac, G. Morel, G. Briant, *High sensitivity transducer for fibre-optic pressure sensing applied to dynamic technical testing and vehicle detection on roads*. Optical Fiber Sensors, Springer-Verlag, Berlin Herdeberg, 44, 1989, 215-221.
- [4] S. Teral, J. Boby, M. Siffert, *Weighing of vehicle in motion using fiber optic sensors*. Electrical Communication, 1, 1994, 74-77
- [5] French Patent n° 88 02 765 (1988).
- [6] Dorr j., *Oberflächenverformung und randkräfte bei runden rollen und borhrungen*. Stahlbau, 24, 1955, 202-206.
- [7] Code CESAR-LCPC, *Manuel d'utilisation LCPC*, Paris, France 2016.